

ORIGEN Y SIGNIFICADO DE LOS CEMENTOS EN LAS ARENISCAS
DE LAS FACIES BUNTSANDSTEIN (RAMA ARAGONESA
DE LA CORDILLERA IBERICA)

POR
JOSÉ ARRIBAS *

RESUMEN

La finalidad de este trabajo es establecer el orden cronológico de los materiales cementantes de las areniscas de las facies Buntsandstein, estudiar su génesis, discutir su significado y analizar su posible relación con el ambiente de sedimentación.

De las relaciones que presentan entre sí los cementos más significativos (filosilicáticos, dolomíticos, ferruginosos, de cuarzo y feldespato potásico), se ha podido establecer dos secuencias de cementación que afectan a las areniscas dependiendo de su posición estratigráfica.

En primer lugar, las cuarzoarenitas y sublitoarenitas de las bases de las series (unidades «Conglomerados y Lutitas del Araviana» y base de «Areniscas de Tierga», según la litoestratigrafía propuesta por ARRIBAS, 1985), están caracterizadas por la secuencia de cementos «coatings» ferruginosos → «clay coats» de illita → «pore fillings» de caolinita → cuarzo → dolomita ferrosa. Los «coatings», «clay coats», «pore fillings», y probablemente el cuarzo, pueden considerarse como cementos eodiagenéticos vinculados a aguas meteóricas (ácidas y oxidantes) en relación con un ambiente de sedimentación continental. Por el contrario, la dolomita ferrosa es más tardía (mesodiagenética).

Las arcosas y subarcosas del resto de las series (unidades «Areniscas de Tierga», «Lutitas y Areniscas de Calcena» y «Lutitas y Margas de Trasobares») presentan una secuencia de cementación temprana

* Departamento de Petrología, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid.

distinta a la anteriormente descrita: «clay rims» de interestratificados I-E → feldespatos potásicos → dolomita → cuarzo → dolomita ferrosa. Como cementos eodiagenéticos se consideran los interestratificados, el feldespatos potásico y la dolomita, los cuales están ligados a ambiente de sedimentación alcalino, propios de ambientes de transición o marinos. La cementación mesodiagenética en estas areniscas se manifiesta con el cemento de cuarzo y la dolomita ferrosa.

Sobre la génesis de los cementos mesodiagenéticos, se deduce que el cemento de cuarzo está directamente relacionado con la potencia de los niveles de lutitas intercalados (fig. 2), atribuyéndose un origen ligado a las aguas expulsadas de dichos niveles. El cemento dolomítico ferroso se relaciona también con los productos de reacción de las transformaciones de los minerales de arcilla de los niveles de lutita y la compactación de estos últimos (fig. 3).

ABSTRACT

The purpose of this work is to establish the chronological order of the cements deposited in the Buntsandstein sandstones, and to study their origin, discuss their significance and analyze their probable association with the sedimentary environment. A special attention has been given to the phases of eodiagenesis and mesodiagenesis.

Two sequences of cementation, that affect the sandstones depending on their stratigraphic position, have been inferred from the interrelation among the most significant cements (phyllosilicates, dolomite, ferruginous, quartz and K-feldspar).

Firstly, the quartzarenites and sublithoarenites situated at the bottom of the sections («Conglomerados y Lutitas del Araviana» unit and the base of «Areniscas de Tierga» unit, according to the lithostratigraphy proposed by ARRIBAS, 1985) are characterized by the following cementation sequence: ferruginous coating → illite clay coats → kaolinite pore fillings → quartz → ferroan dolomite. The coating, clay coats, pore fillings and probably the quartz can be considered eodiagenetic cements related to meteoric waters (acidic and oxidizing) associated with a continental sedimentary environment (ALMOND & DAVIES, 1979; HURST & IRWIN, 1982, among others). On the contrary the ferroan dolomite is deposited during the mesodiagenesis.

Secondly, the arkoses and subarkoses of the rest of the section («Areniscas de Tierga», «Lutitas y Areniscas de Calcena» and «Lutita y Margas de Trasobares» units) present an early cementation sequence different from the one described above: I-S mixed layer clay rims → K-feldspar → dolomite → quartz → ferroan dolomite. The mixed layers, K-feldspar and dolomite are considered as eodiagenetic cements.

related to an alkaline sedimentary environment, typical of transitional or marine environment (ALMON et al., 1976; HAWKINS, 1978; HURST & IRWIN, 1982; among others). The quartz and ferroan dolomite are considered as mesodiagenetic cements.

The quartz cement is directly related to the thickness of the interbedded lutites (fig. 2), and its origin is associated with the waters expelled from the lutites. The ferroan dolomite is also related to the reactive products originated by clay minerals transformations that occur within the lutite levels (fig. 3).

I. INTRODUCCION

En los últimos años se han publicado numerosos trabajos sobre diagénesis de areniscas donde se intenta ligar los procesos de las primeras etapas diagenéticas con el ambiente de sedimentación en el que se produjo el depósito original (HURST & IRWING, 1982; BURLEY *et al.*, 1985; entre otros). Este análisis de la diagénesis se ha basado sistemáticamente en las condiciones fisicoquímicas de estabilidad de las distintas fases minerales diagenéticas y en su cronología.

Con este trabajo pretendemos estudiar las características, génesis, significado y orden de precipitación de los cementos en las areniscas de las facies Buntsandstein de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica en su zona norte (fig. 1A), con el fin de valorar la influencia del ambiente de sedimentación en las primeras etapas diagenéticas.

Sobre una base litoestratigráfica y petrológica conocida (ARRIBAS, 1984 y 1985), se han analizado sobre lámina delgada un total de 250 muestras de areniscas correspondientes a ocho secciones estratigráficas. Se ha realizado un conteo de 300 puntos por término medio en cada lámina para la cuantificación de parámetros relacionados con la textura y mineralogía de los componentes de las areniscas. En ocasiones se han utilizado técnicas petrográficas complementarias como catodoluminiscencia y M. E. B. junto con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X.

II. LITOESTRATIGRAFIA, COMPOSICION Y PROCEDENCIA DE LAS ARENISCAS

El Trías del borde norte de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica corresponde a una zona de tránsito entre el litotipo ibérico y mediterráneo. Las facies Buntsandstein se presentan con potencias que oscilan entre 200 y 500 m., y en ellas se han establecido cuatro

Cabe destacar que la unidad basal «Conglomerados y Lutitas del Araviana» ha sido interpretada como depósitos continentales (abanicos aluviales) correlacionables litológicamente con los depósitos de edad pérmica que afloran en ciertos sectores de la Rama Castellana («facies saxoniense»). Por otro lado, la tipología de los granos de cuarzo de las areniscas (cuarzoarenitas y sublitoarenitas) denotan áreas fuentes metamórficas de bajo grado.

Las areniscas del resto de las unidades presentan una composición más semejante entre sí (subarcosas en la unidad «Areniscas de Tierga» y arcosas en el resto de las unidades), correspondiendo a depósitos aluviales que evolucionan hacia el techo a ambientes de transición controlados por mareas. La composición de las areniscas indica además un brusco cambio en la naturaleza de las áreas fuentes, haciéndose dominantes las áreas granítico-gneísicas, si bien existe un influjo local de zonas metamórficas de bajo grado (ARRIBAS *et al.*, 1985).

Por otra parte, y para un mayor detalle de los procesos diagenéticos sufridos por estos materiales remitimos a la tesis doctoral del autor (ARRIBAS, 1984), así como a la publicación de ARRIBAS y SORIANO (1984).

III. LOS CEMENTOS DE LAS ARENISCAS

En este trabajo hemos considerado los cementos principales de las areniscas, cuya composición es: cuarzo, feldespato potásico, carbonático, ferruginoso y baritina; así como también el conjunto de minerales filosilicáticos neoformados.

— *Cementos filosilicáticos.* Se han identificado cementos de caolinita, illita e interestratificados I-E; sin embargo, son cuantitativamente poco importantes.

La caolinita se encuentra formando «pore fillings». Se han distinguido dos momentos de formación de estos rellenos: uno temprano, que queda evidenciado en la base de las series; y otro más tardío y observable en el techo de las mismas.

Por lo que respecta a la primera generación, se presentan en espacios intersticiales en contacto con los granos detríticos. Forman agregados en abanico «face to face» poco desarrollados, de pequeño tamaño cristalino, entremezclados con láminas de illitas. Los minerales de illita se encuentran pseudomorfizando a la caolinita, observándose muy a menudo illitas con formas típicas en abanico. La aparición de estos «pore fillings» se produce en las unidades «Conglomerados y Lutitas del Araviana» y en la base de «Areniscas de Tierga», sin que

su presencia sea constante. Petrográficamente, puede afirmarse que la formación de este cemento es temprana y se produce antes de la cementación del cuarzo, ya que los bordes del poro primitivo lo forman las superficies de granos detríticos de cuarzo sin cemento sintaxial. Además suelen encontrarse a menudo deformados por la compactación mecánica.

Según HURST e IRWIN (1982) existe una íntima relación entre los cementos tempranos de caolinita y las facies fluviales. Este hecho puede ser explicado por el bajo pH y concentración iónica de las aguas meteóricas, produciendo la descomposición de los feldespatos y consiguiente precipitación de la caolinita. No hemos encontrado criterios para pensar en una alteración intraestratal de los feldespatos por lo que consideramos que dicha alteración tuvo lugar en ambiente hipergénico.

Existe una segunda generación de «pore fillings» de caolinitas mucho más desarrollada, que se encuentra rellenando poros de morfología muy irregular sobre el cemento dolomítico. Estos cementos se localizan en las unidades del techo de las facies Buntsandstein y son cuantitativamente más importantes que los comentados anteriormente. El hecho de que se encuentren rellenando poros de disolución de cemento dolomítico establece un límite relativamente tardío de formación.

Durante el enterramiento diagenético existen una serie de procesos que pueden llegar a provocar una acidificación de las aguas diagenéticas. La maduración de la materia orgánica es una de las causas principales esgrimidas por algunos autores para explicar la disolución del cemento carbonático (SCHMIDT y MCDONALD, 1979), e incluso para afirmar la existencia de un proceso simultáneo de disolución de carbonato y la precipitación de la caolinita (CURTIS, 1983). No obstante, consideramos que la neoformación de caolinita en las muestras analizadas no se le puede atribuir un origen a partir de la maduración de la materia orgánica, por su escasa presencia en los niveles lutítico incapaz de producir una acidificación de las aguas diagenéticas suficientemente importante como para disolver el cemento carbonático y generar posteriormente la caolinita. La circulación de aguas ácidas de origen meteórico en las primeras etapas telodiagenéticas explica de forma más satisfactoria la disolución del cemento dolomítico y la precipitación de la caolinita (ARRIBAS y SORIANO, 1984).

Los «pore lining» están constituidos por ilita, presentándose en todas las unidades litoestratigráficas en mayor o menor proporción y de forma discontinua. Dentro de este tipo textural de cemento filossilicático cabe diferenciar los «clay rims» y los «clay coats».

Los «clay coats» (o «pore lining» tangenciales) son de ilitas que no llegan a formar envueltas completas. En la mayoría de los casos

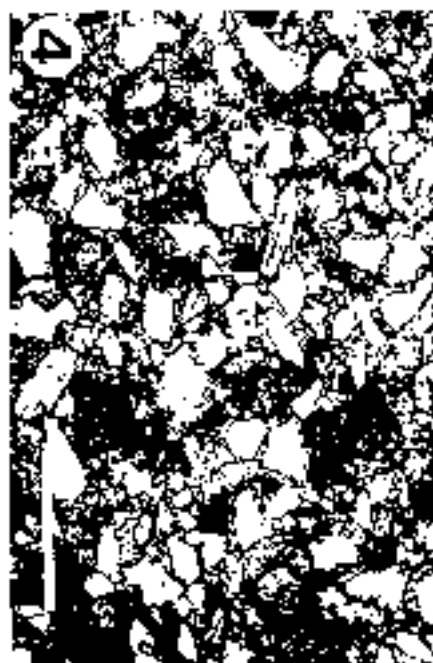
quedan incluidos dentro del crecimiento sintaxial de los granos detríticos. Su aparición parece estar restringida a la mitad inferior de las series. GALLOWAY (1979) considera que los «clay coats» son el producto típico de un proceso de iluviación de material coloidal sobre la superficie de los granos en un estado de diagénesis temprana.

Por lo que respecta a los «clay rims» («pore lining» perpendiculares) su aparición es bastante esporádica. Se encuentran en la mitad superior de las series y están constituidos fundamentalmente por illita. Con el microscopio electrónico de barrido y el E. D. A. X. hemos podido reconocer la presencia de interestratificados I-E formando «clay rims» con textura en panal y una composición elemental de Si (20%), Al (6%), K (6%), Ca (6%), Fe (9%), Mg (14%) y O (38%).

Consideramos que los «caly rims» de illita originariamente estarían constituidos por esmectitas o interestratificados I-E, que en el transcurso de la diagénesis se transformarían progresivamente a illita. HAWKINS (1978) atribuye la formación de «clay rims» de esmectitas e interestratificados I-E a un origen bajo ambiente marino donde el Eh es ligeramente positivo y con un pH alrededor de 7,6. Asimismo son abundantes las citas posteriores donde se describe la aparición de estas mineralogías como precipitados tempranos en ambiente de transición y marino (BOLES y FRANKS, 1979; LAMBERT y SHOW, 1982; MORRIS y SHEPPERD, 1982; entre otros).

— *Cemento de cuarzo.* Es el de mayor importancia cuantitativa llegando incluso a valores del 28% del total de la roca. Siempre se presenta como crecimientos sintaxiales. Su presencia llega a ser muy importante en las areniscas de la unidad basal, donde es prácticamente el único constituyente que cierra la porosidad primaria. En el resto de las unidades es también muy frecuente su aparición, pero comparte con otras mineralogías cementantes los espacios intergranulares. Petrográficamente, este cemento presenta evidencias para considerarlo como uno de los primeros, al situarse directamente sobre los granos o sobre «pore lining» arcillosos y envueltas ferruginosas. No obstante, y como veremos más adelante, existen criterios para poder afirmar su posterioridad al cemento de feldespato potásico (lám. I-1).

El origen que se ha atribuido en la bibliografía a la sílice generadora del cemento de cuarzo en areniscas puede ser concretado en: 1) un origen «autóctono» de la sílice a partir de los procesos de presión-disolución, y 2) un origen «alóctono» al estrato de areniscas, a partir de soluciones sobresaturadas en sílice. Por lo que respecta al primer caso, y del análisis de microfotografías por catodoluminiscencia de las areniscas, se observa que existen evidencias de procesos tempranos de presión-disolución entre los granos detríticos. No obstante, consi-



deramos que la sílice liberada por estos procesos no es suficiente como para producir las importantes cementaciones de la unidad basal.

En relación a un origen alóctono de la sílice, SIEVER (1957) se inclina por las transformaciones de los silicatos, incluyendo la alteración de feldespatos y otros silicatos por medio de aguas meteóricas ácidas. PETTIJOHN *et al.* (1972) y HOWER *et al.* (1976) afirman que el paso de montmorillonita a illita puede también aportar sílice disuelta a las aguas intersticiales. Según estas ideas la compactación de los niveles de lutitas intercalados con las areniscas produce una circulación de aguas ascendentes cargadas en sílice y cationes (hierro y magnesio entre otros) producto de las transformaciones de los minerales de arcilla (esmeclitas → interestratificados I-E → illita), según FÜCHTBAUER (1967) y BOLES & FRANKS (1979). En ARRIBAS (1984) se subraya el alto grado de cristalinidad de las illitas en los niveles de lutitas intercalados entre las areniscas de las facies Buntsandstein. Tanto esta cicatrización de las illitas como las transformaciones de interestratificados I-E a illita juegan un papel importante en el aporte de sílice al medio.

Para poder verificar la transcendencia de estas transformaciones en la cementación de cuarzo en las areniscas estudiadas, se ha observado en cada una de las muestras la relación existente entre su contenido en cemento silíceo y la potencia del nivel lutítico inmediatamente inferior al nivel de la arenisca correspondiente. Si además, consideramos que el flujo acuoso es ascendente también intervendrá en esta relación la posición que ocupe la muestra dentro del nivel arenoso; es decir, su distancia a la base del nivel. De este modo, y a la vista de los resultados de la figura 2, puede afirmarse que no existen muestras con un importante contenido en cemento silíceo para valores de Pb/Pl. inf. elevados; es decir cuando los niveles de lutitas inferiores son poco potentes o la distancia a la base del nivel arenoso es muy elevada. No obstante, existe un gran número de muestras poco cementadas por cuarzo sobre niveles lutíticos potentes, o próximos a ellos. En este caso intervienen otros factores, como puede ser la presencia

LÁM. I.—1. Cementos sintaxiales de cuarzo y feldespato potásico, amoldándose los primeros a las formas idiomorfas del cemento de feldespato. N.C. Escala: 0,1 mm. 2. Crecimiento sintaxial de feldespato potásico con hábito de adularia. N.C. Escala: 0,1 mm. 3. Feldespato potásico recrecido y fracturado. El relleno de la fractura es de cuarzo. N.P. Escala: 0,1 mm. 4. Cemento dolomítico en mosaico. N.P. Escala: 0,5 mm.

1. Quartz and K-feldspar grains with overgrowths. Note how quartz overgrowths postdate K-feldspar cement. C.N. Scale bar: 0,1 mm. 2. K-feldspar overgrowth with adularia habit. C.N. Scale bar: 0,1 mm. 3. K-feldspar overgrowth broken by mechanical compaction. Pore space is filled by quartz cement. P.N. Scale bar: 0,1 mm. 4. Mosaic of dolomite cement. P.N. Scale bar: 0,5 mm.

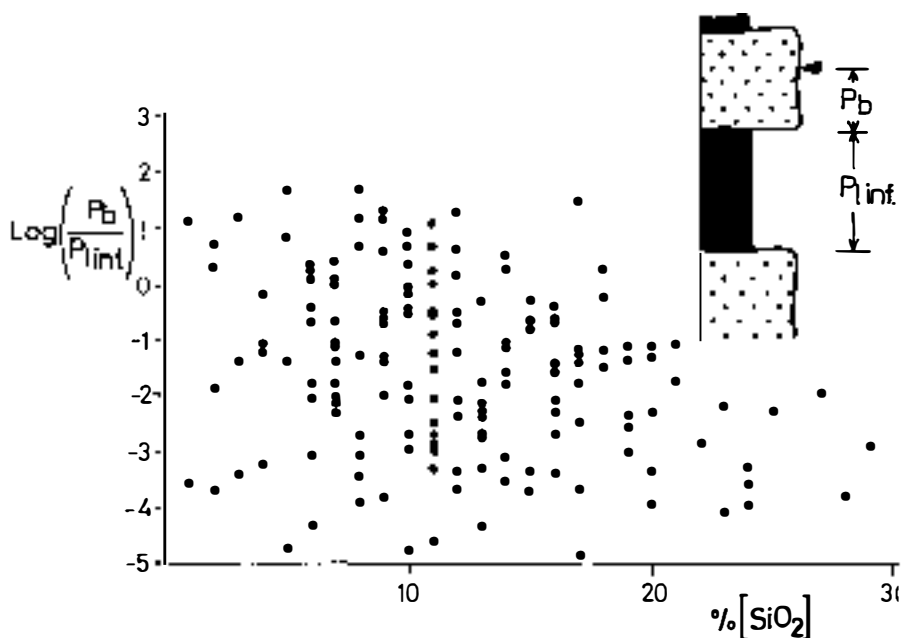


FIG. 2.—Diagrama de la distribución del cemento de cuarzo en las arenas de las facies Buntsandstein en relación a la potencia del nivel lutítico inferior (P_{lint}) y a su posición dentro del nivel arenoso (P_b).

Diagram showing the distribution of quartz cement of Buntsandstein sands versus the ratio between the sample position in the sandstone level (P) and the thickness of the lower interbedded lutitic level (P_{lint}).

de cementos anteriores al cuarzo (dolomítico, filosilicático) que ha cerrado el paso a la cementación silíceo posterior. También es importante señalar que la presencia de cantos blandos, generadores de pseudomatrix por compactación, en las bases de las facies canalizadas redujeron la porosidad con anterioridad a la cementación silíceo.

— *Cemento de feldespato potásico.* Es poco importante cuantitativamente, no superando el 5% del total de la roca, y restringiéndose su aparición a las unidades «Areniscas de Tierga» y superiores. Petrográficamente se presenta como crecimientos sintaxiales con hábito adularia (lám. I-2). Este cemento puede situarse en el tiempo como anterior al cemento silíceo, observándose cómo siempre el cemento de feldespato termina en el contacto con los granos detríticos de cuarzo. Por el contrario el cemento silíceo se amolda a las formas euhedrales del feldespato potásico. Además, ha sido posible observar ocasionalmente cómo el cemento de feldespato potásico se encuen-

fracturado debido a la compactación mecánica de la roca (lám. I-3). Estas observaciones, junto con el gran idiomorfismo, apoyan la idea de una precipitación temprana en ambiente eodiagenético, cuando los poros intersticiales se encontraban prácticamente libres de otras mineralogías diagenéticas.

La neoformación de feldespato potásico requiere un ambiente diagenético alcalino que pueda aportar potasio, aluminio y sílice. Algunos autores han sugerido que en ambiente marino los minerales de arcilla liberan sílice, y que la alteración de los feldespatos puede suministrar aluminio, sílice y potasio al agua del mar o a las aguas intersticiales (BERG, 1952; KASTNER, 1971). En este sentido, FÜCHTBAUER (1967) encuentra en el Keuper de Alemania (ambiente de sedimentación deltaico) que el primer cemento en precipitar es el feldespato potásico. WAUGH (1978) afirma que la fuente de los tres cationes necesarios para la neoformación de feldespato potásico puede buscarse en un ambiente continental por disolución intraestratal de silicatos detríticos, provocando de este modo la formación de soluciones alcalinas intersticiales. En nuestro caso el recrecimiento de feldespato potásico implicaría unas condiciones diagenéticas alcalinas tempranas, acorde también con la formación previa de «clay rims» de interestratificados I-E. Estas observaciones estarían de acuerdo con las características geoquímicas de los ambientes de sedimentación deducidos (en ARRIBAS, 1984), donde los recrecimientos de feldespato potásico pueden correlacionarse con los ambientes de transición. Por otra parte, en las facies interpretadas como fluviales no se han apreciado estos recrecimientos ni otra mineralogía diagenética temprana que indique condiciones alcalinas.

— *Cemento carbonático.* Se han diferenciado tres tipos de cemento carbonático atendiendo a su composición: dolomítico, dolomítico ferroso y de calcita. Su presencia no es constante, superando ocasionalmente el 30% del total de la roca.

El cemento dolomítico aparece en la unidad «Areniscas de Tierga» y superiores, siendo en estas últimas donde se da con mayor profusión. Texturalmente se presenta bien como mosaicos equigranulares o constituidos por grandes cristales poiquilotópicos. Es muy común que en las areniscas donde se presenta este tipo de cemento, el cemento silíceo se encuentre en baja proporción. También es frecuente la escasez de pseudomatriz y el bajo número de contactos entre granos del esqueleto que indican una compactación reducida de la roca (lám. I-4). El cemento de feldespato potásico se desarrolla en estas areniscas en proporciones semejantes al resto de las areniscas no cementadas por dolomita. Todos estos hechos parecen confirmar una cementación dolomítica en etapas eodiagenéticas o mesodiagenéticas tempranas,

posteriores al cemento de feldespato potásico y previa a la cementación general de cuarzo. Asimismo, las escasas evidencias de compactación en estas areniscas refuerzan la idea de que la cementación dolomítica ha protegido al esqueleto de los efectos de la presión con la litificación temprana de la roca. La generación de este cemento dolomítico tendió a tener lugar en un ambiente diagenético donde los fluidos dolomitizantes ricos en magnesio podrían provenir de la percolación de soluciones alcalinas de los ambientes áridos de sedimentación deducidos por las unidades superiores de las facies Buntsandstein.

El cemento dolomítico ferroso es muy frecuente en todas las unidades de las facies Buntsandstein, presentándose siempre como grandes cristales sin llegar a formar texturas poiquilóticas. Aparecen como importantes texturas de reemplazamiento, corroyendo a otros cementos y componentes del esqueleto, así como reemplazando a feldespatos incluso a la matriz arcillosa (lám. II-1). Por su relación textural con el resto de los componentes de las areniscas, puede considerarse uno de los últimos cementos mesodiagenéticos, confirmándose también por su elevada «agresividad» frente a las restantes mineralogías diagenéticas. En la figura 3 se ha representado la relación de este cemento con la potencia de los niveles de lutitas intercalados, observándose una tendencia muy semejante a la del cemento de cuarzo, por lo que su génesis puede también asimilarse a un proceso de bombeo de aguas ricas en Mg^{++} , Ca^{++} y Fe^{++} de los niveles lutíticos intercalados, reemplazando en una primera fase la escasa porosidad primaria, y reemplazando posteriormente al cuarzo, feldespato, etc. (fig. 4).

El cemento de calcita es menos frecuente que el dolomítico, siendo normal su asociación con este último, y fundamentalmente con la dolomita ferrosa. Generalmente se presenta formando mosaicos poiquigranulares xenotópicos, o también formando cristales aislados e isohedrales. Son asimismo frecuentes las texturas de reemplazamiento con respecto a otras mineralogías silicatadas. Tanto los mosaicos como los cristales aislados presentan abundantes impurezas de óxidos

LÁM. II.—1. Reemplazamiento de feldespato potásico por cemento dolomítico ferroso. N.C. Escala: 0,2 mm. 2. Envueltas continuas de cemento ferruginoso alrededor de los granos detríticos. N.P. Escala: 0,2 mm. 3. Envueltas ferruginosas discontinuas alrededor de los granos detríticos. Nótese su ausencia en los puntos de contacto entre granos. N.P. 4. Cemento ferruginoso rellenando porosidad secundaria de disolución de feldespato potásico. N.P. Escala: 0,2 mm.

1. Replacement of K-feldspar by ferroan dolomite. C.N. Scale bar: 0,2 mm. 2. Well developed and continuous coatings of ferric oxides around detrital grains. P.N. Scale bar: 0,2 mm. 3. Discontinuous coatings of ferric oxides. Note absence in the contact between grains. P.N. Scale bar: 0,2 mm. 4. Ferric oxide cement filling pore space of secondary origin (dissolution of K-feldspar). P.N. Scale bar: 0,2 mm.



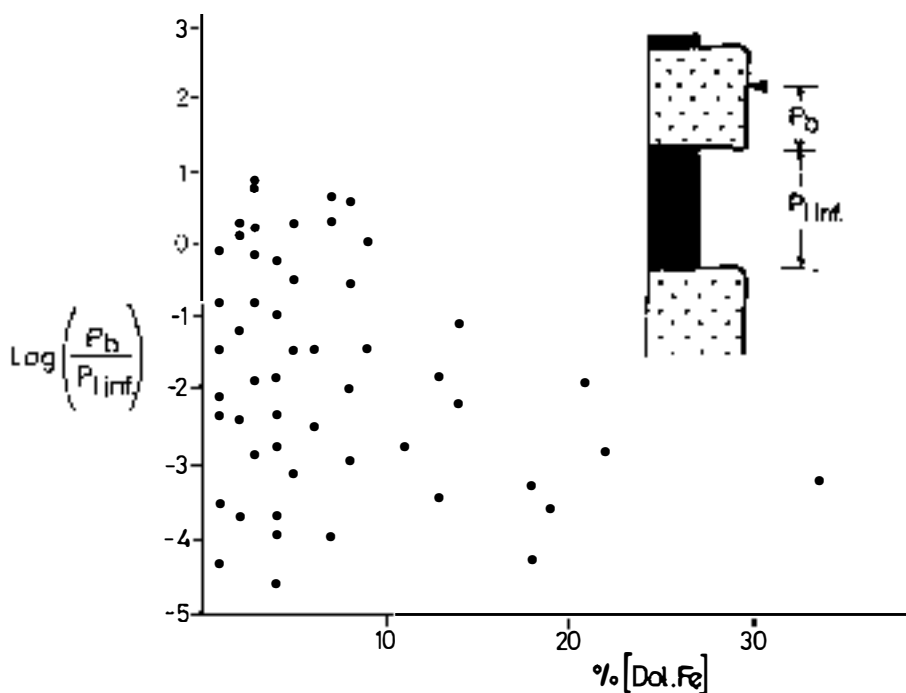


FIG. 3.— Diagrama de la distribución del cemento dolomítico ferroso en las areniscas de las facies Buntsandstein en relación a la potencia del nivel lutiti inferior (Pl_{inf}) y a su posición dentro del nivel arenoso (P_b).

FIG. 3.—Diagram showing the distribution of ferroan dolomite cement of Bunsandstein sandstones versus the ratio between the sample position in the sandstone level (P_b), and the thickness of the lower interbedded lutitic level (Pl_{inf}).

hierro, enfatizando antiguos rombos o marcando los planos de exfoliación de la calcita. Este hecho unido a su asociación con el cemento dolomítico, induce a pensar que el «cemento» de calcita es el producto de la dedolomitización de la dolomita ferrosa.

En la figura 5 hemos representado los porcentajes de los cementos carbonáticos en relación al cemento de cuarzo. En dicha figura puede apreciarse una diferenciación clara entre el cemento dolomítico y dolomítico ferroso, debido a su momento de formación. Mientras que la dolomita ferrosa se encuentra en baja proporción en areniscas con un amplio rango de cemento silíceo, la dolomita no ferrosa aparece en areniscas con escaso cemento silíceo. Estos resultados confirman la existencia de las dos generaciones de cemento dolomítico en relación con la cementación silícea: una anterior (dolomita no ferrosa) y otra posterior (dolomita ferrosa).

— *Cemento ferruginoso*. Su contenido en las areniscas varía mucho (1 al 24%). Se encuentra formando tres fases de cementación, dos tempranas y una tardía.

La etapa más temprana se manifiesta por medio de envueltas ferruginosas alrededor de los granos detríticos de cuarzo. Este tipo de cemento es muy abundante en las areniscas de la unidad «Conglomerados y Lutitas del Araviana» y en la base de «Areniscas de Tierga», siendo más ocasional su aparición conforme nos movemos hacia el techo de las series en el resto de las unidades. Estas envueltas ferruginosas se caracterizan por ser continuas y estar bordeando totalmente a los granos de cuarzo (lám. II-2). El hecho de que incluso en los puntos de contacto entre distintos granos del esqueleto esté presente este tipo de cemento, indica que su formación se remonta a etapas diagenéticas muy tempranas, ligadas directamente con el ambiente de sedimentación, o que es heredado.

Existe además una segunda fase de cementación por óxidos de hierro también muy temprana, formando envueltas alrededor de los granos del esqueleto. La diferencia fundamental de esta cementación

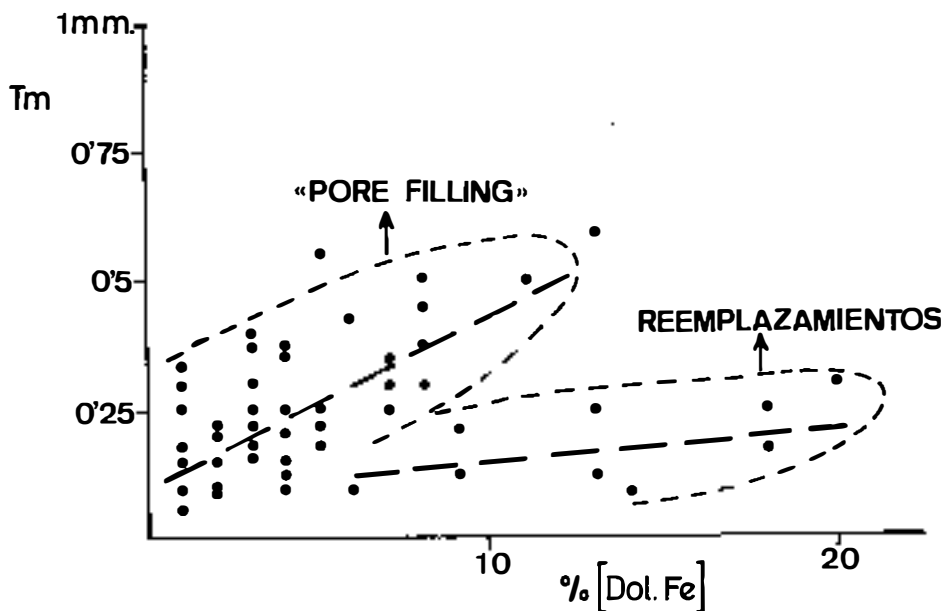


FIG. 4.—Diagrama de la distribución del cemento dolomítico ferroso de las areniscas de las facies Buntsandstein, en relación con el tamaño medio de los granos detríticos.

Diagram showing the distribution of ferroan dolomite cement of Buntsandstein sandstones versus detrital grain size.

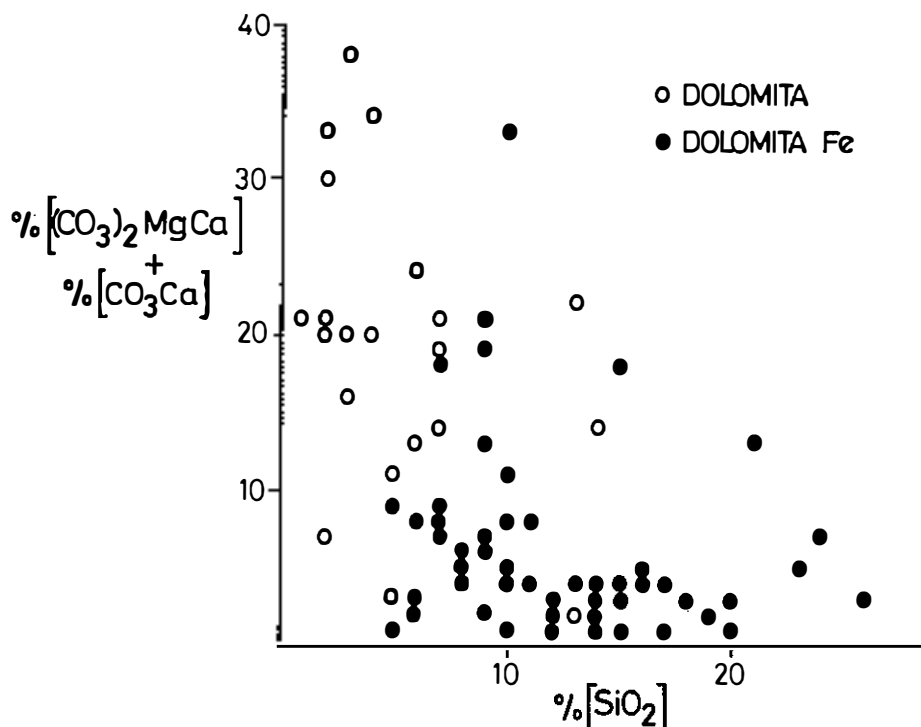


FIG. 5.—Diagrama de la distribución del cemento de cuarzo en relación con los cementos carbonáticos en las areniscas de las facies Buntsandstein.

Diagram showing the distribution of quartz cement versus carbonate cement of the Buntsandstein sandstones.

con respecto a la anterior es la discontinuidad de las envueltas, siendo característico de ellas su ausencia en los puntos de contacto entre granos, lo que indica que se trata de una cementación más tardía (lám. II-3). Su aparición no se generaliza en todas las areniscas, sino que se encuentra fundamentalmente en la unidad «Areniscas de Tierga», siendo más ocasional su aparición en las unidades superiores.

Por último, existe una tercera fase ligada a un ambiente telodiagnético, rellenando porosidad secundaria producida por la disolución de feldespatos y cemento carbonático (lám. II-4).

WALKER y WAUGH (1973) y WALKER (1976) consideran que las envueltas ferruginosas se originan como respuesta de la alteración intraestratal de minerales inestables (silicatos ferromagnesianos). También según WALKER (1967), el primer mineral formado parece ser una mineralogía hidratada precursora de la hematites. Este mismo

autor afirma que este proceso puede estar ligado a variaciones del nivel freático en ambientes fluviales. La génesis de las envueltas ferruginosas de las areniscas de las facies Buntsandstein parece estar de acuerdo con las ideas de WALKER (1967). Sin embargo, la primera generación puede considerarse como un cemento «heredado» y/o producido en el medio de transporte. La segunda generación de envueltas puede tener un mismo origen, pero su formación ocurrió durante la eodiagénesis. Por otra parte, en este segundo caso pudo haber influenciado la precipitación de este cemento el efecto de mezcla de aguas. RUNNELS (1969) afirma que la mezcla de dos tipos de aguas con una diferencia apreciable en el pH, reduce la curva de solubilidad del hidróxido férrico, siendo estable su fase sólida.

— *Cemento de baritina*. Se encuentra muy localizado en la unidad «Conglomerados y Lutitas del Araviana» y en la base de «Areniscas de Tierga». Se presenta como parches monocristalinos, con abundantes texturas de corrosión y reemplazamientos a los silicatos y carbonatos. Ocasionalmente puede llegar a constituir pequeños cementos poiquilóticos. Petrográficamente es posible observar cómo corroe a la dolomita ferrosa, por lo que constituye el último cemento mesodiagenético. Nos inclinamos por un origen hidrotermal de la baritina (DEER *et al.*, 1962), fundamentalmente por su localización, siempre en las bases de las columnas, y por haberse observado a escala de campo venas de este mineral atravesando las areniscas.

IV. SECUENCIAS DE CEMENTACION: MODELO DIAGENETICO Y SU SIGNIFICADO

En el apartado anterior ha quedado patente que existen una serie de cementos que se localizan en las areniscas de determinadas unidades litoestratigráficas y que por lo tanto señalan la existencia de evoluciones diagenéticas distintas en relación con la litoestratigrafía. Además, a lo largo de la diagénesis se produce una sucesión de cementos que marcan también la evolución fisicoquímica de los distintos ambientes diagenéticos en una determinada arenisca.

Por lo que respecta a la variación de los cementos con respecto a la posición litoestratigráfica, es posible diferenciar a grandes rasgos dos tipos extremos de areniscas caracterizadas por una diagénesis diferente. Por una parte las correspondientes a la unidad «Conglomerados y Lutitas del Araviana» y base de «Areniscas de Tierga», y por otra las que se encuentran incluidas en el resto de las unidades («Areniscas de Tierga», «Lutitas y Areniscas de Calcena» y «Lutitas y Margas de Trasobares»). El límite entre estos dos tipos de areniscas no es neto,

ya que los procesos diagenéticos aparecen y desaparecen gradualmente. La sucesión de los distintos tipos de cementos a lo largo de las diferentes etapas diagenéticas en estos dos tipos extremos de areniscas puede resumirse:

— *Cuarzoarenitas, sublitoarenitas y subarcosas de «Conglomerados y Lutitas del Araviana» y «Areniscas de Tierga» (base).* Las primeras manifestaciones diagenéticas que se registran son las que se relacionan con la geoquímica del ambiente de sedimentación o eodiagénesis. Detacamos en esta etapa la formación de envueltas ferruginosas, la formación de los «clay coats» de illita, así como los «pore filling» de caolinita, siguiendo este mismo orden de formación. Todos estos procesos señalan unas condiciones ácidas del medio de sedimentación en un ambiente oxidante controlado por la circulación de aguas meteoricas (ALMON & DAVIES, 1979; HURST & IRWIN, 1982; BURLE *et al.*, 1985, entre otros).

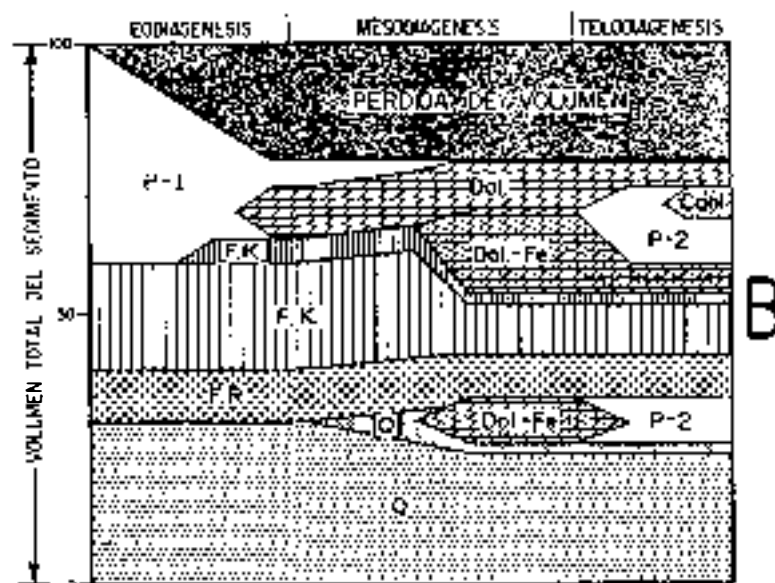
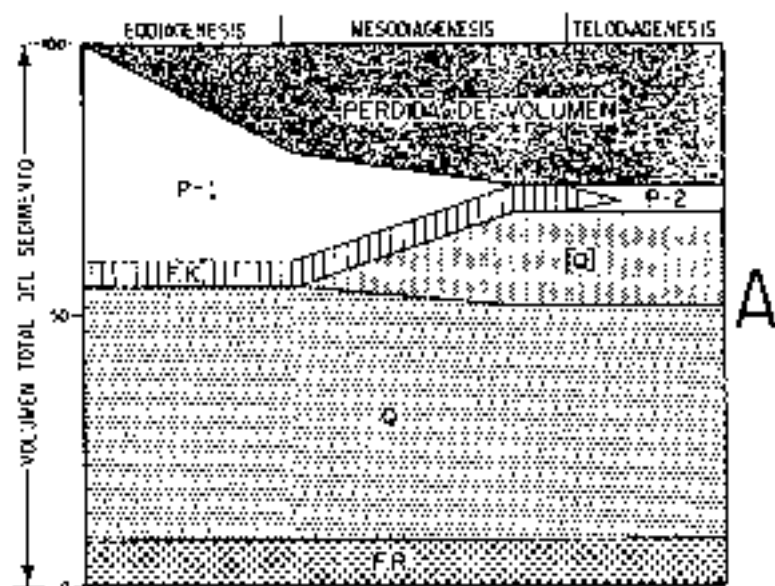
Durante la mesodiagénesis se produce la cementación de cuarzo tan importante en estas areniscas. La fuente de SiO_2 puede encontrarse en las lutitas intercaladas, que por la compactación originan un flujo acuoso ascendente rico en sílice, liberada en las transformaciones de interestratificados I-E a illita y por la posible disolución de los feldespatos concentrados en estos niveles. También la formación posterior del cemento de dolomita ferrosa puede explicarse con este mismo mecanismo para la fuente del Fe^{++} y Mg^{++} . Finalmente, en las últimas etapas mesodiagenéticas, se produce la cementación de baritina de origen hidrotermal.

En la telodiagénesis las areniscas se encuentran de nuevo bajo circulación de aguas meteoricas subsaturadas en cationes que provocan la disolución del feldespato potásico (ARRIBAS y SORIANO, 1985) así como la cementación posterior por óxidos de hierro.

En la figura 6 se resumen los procesos principales a lo largo del tiempo y en relación a la composición inicial de las areniscas.

FIG. 6.—Modelos diagenéticos de las areniscas de las facies Buntsandstein. A: Areniscas de las unidades «Conglomerados y Lutitas del Araviana» y base de «Areniscas de Tierga». B: Areniscas de las unidades «Areniscas de Tierga», «Lutitas y Areniscas de Calcena» y «Lutitas y Margas de Trasobares». Q: cuarzo. FK: feldespato potásico. FR: fragmentos de roca. Dol: cemento dolomítico. Fe: cemento dolomítico ferroso. [Q]: cemento de cuarzo. [FK]: cemento de feldespato potásico. Caol: «pore filling» de caolinitas (según ARRIBAS, 1984).

Diagenetic models of the Buntsandstein sandstones. A: Sandstones of «Conglomerados y Lutitas del Araviana» lithostratigraphic unit and base of «Areniscas de Tierga» unit. B: Sandstones of «Areniscas de Tierga», «Lutitas y Areniscas de Calcena» and «Lutitas y Margas de Trasobares» lithostratigraphic units. Q: detrital quartz. FK: detrital K-feldspar. FR: rock fragments. Dol: dolomite cement. Fe: ferroan dolomite cement. [Q]: quartz cement. [FK]: K-feldspar cement. Caol: caolinite pore filling (from ARRIBAS, 1984).



— *Subarcosas y arcosas de «Areniscas de Tierga», «Lutitas y Areniscas de Calcena» y «Lutitas y Margas de Trasobares»*. En el transcurso de la eodiagénesis se produce la formación de los «clay rim (esmectitas?), los cementos de feldespatos potásico y de dolomita. Es decir, las aguas de la diagénesis temprana tienen un carácter alcalino ligadas al ambiente de sedimentación. El cemento de feldespato potásico ha sido citado frecuentemente en areniscas sedimentadas en ambiente continental (FÜCHTBAUER, 1967; WAUGH, 1978; BURLEY *et al.*, 1985; HUGGETT, 1984). Sin embargo, en estos casos este cemento va íntimamente asociado al cemento de cuarzo y generalmente posterior a los «pore fillings» de caolinitas. FÜCHTBAUER (1976) analiza las secuencias diagenéticas de precipitación de cementos en relación con los distintos ambientes de sedimentación en areniscas Permian-Triásicas de Alemania, observando cómo es bajo ambiente deltaico (Keuper) cuando el primer cemento en precipitar es el feldespato potásico. En facies fluviales (Buntsandstein) este mismo autor encuentra que es la caolinita la que inicia la precipitación de los cementos. La secuencia de precipitación de los cementos eodiagenéticos de las areniscas analizadas, se aproxima a los órdenes de cementación de ambientes de transición y/o marinos (ALMON *et al.*, 1976; HAWKINS, 1978; TILLMAN & ALMON, 1979; HURST & IRWIN, 1982). Es muy probable que la mayoría de estos procesos se hayan generado a consecuencia de mezcla de aguas.

Una vez aislados los depósitos de la influencia del ambiente de sedimentación (mesodiagénesis), se observa cómo la pauta de los cementos es muy semejante a la de las areniscas infrayacentes (cemento de cuarzo → dolomita ferrosa), si bien en estas areniscas la cementación de la dolomía ferrosa tiene una mayor importancia. Del mismo modo que para las areniscas anteriores, el origen de los cationes necesarios puede explicarse a partir de los fluidos expulsados de los niveles de lutitas intercaladas.

Por último, durante la telodiagénesis tiene lugar una importante disolución de los carbonatos (ARRIBAS y SORIANO, 1984), la dedolomitización, la cementación de caolinita y óxidos de hierro, en un ambiente ácido y oxidante.

En la figura 6 B se ha representado también un esquema de la evolución de la composición durante la diagénesis en este tipo de areniscas, señalada por los procesos más significativos.

Resumiendo, podemos afirmar que la diferencia entre los dos tipos de areniscas comentados, a parte de su composición inicial, estriba en la diagénesis temprana (eodiagénesis) controlada por ambientes de sedimentación con distintos quimismos. Durante la mesodiagénesis geoquímica de las aguas intersticiales se homogeniza en ambos casos marcada por los fluidos expulsados de las lutitas intercaladas.

V. BIBLIOGRAFIA

- ALMON, W. R.; FULLERTON, L. B., y DAVIES, D. K. (1976): «Pore space reduction in Cretaceous sandstones through chemical precipitation of clay minerals». *Jour. Sed. Petrol.*, 46, pp. 89-96.
- ALMON, W. R., y DAVIES, D. K. (1979): «Regional diagenetic trends in the Lower Cretaceous muddy sandstone, Powder River Basin». *S. E. P. M., Spec. Publ.*, 26, pp. 379-400.
- ARRIBAS, J. (1984): *Sedimentología y diagénesis del Buntsandstein y Muchelkalk de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (provincias de Soria y Zaragoza)*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 354 pp.
- ARRIBAS, J. (1985): «Base litoestratigráfica de las facies Buntsandstein y Muchelkalk en la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (Zona norte)». *Estudios Geol.*, 41, pp. 47-57.
- ARRIBAS, J., y SORIANO, J. (1984): «La porosidad en las areniscas triásicas (Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica)». *Estudios Geol.*, 40, pp. 341-353.
- ARRIBAS, J.; MARFIL, R., y DE LA PEÑA, J. A. (1985): «Provenance of Triassic feldspathic sandstones in the Iberian Range (Spain): Significance of quartz types». *Jour. Sed. Petrol.*, 55, pp. 864-868.
- BERG, R. R. (1952): «Feldspathized sandstone». *Jour. Sed. Petrol.*, 22, pp. 221-223.
- BOLES, J. R., y FRANKS, S. G. (1979): «Clay diagenesis in Wilcox sandstones of southwest Texas: implications of smectite diagenesis on sandstone cementation». *Jour. Sed. Petrol.*, 49, pp. 55-70.
- BURLEY, S. D.; KANTOROWICZ, J. D., y WAUGH, B. (1985): «Clastic diagenesis». En: *Sedimentology: Recent developments and applied aspects*. P. J. Brenchley y B. P. Williams Ed. Blackwell Sci. Publ., Oxford, pp. 189-226.
- CURTIS, C. D. (1983): «Link between aluminium mobility and destruction of secondary porosity». *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 67, pp. 380-393.
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A., y ZUSSMAN, J. (1962): *Rock-Forming Minerals. V. Non silicates*. Longmans, London, 270 pp.
- FÜCHTBAUER, H. (1967): «Influence of different types of diagenesis on sandstone porosity». *VII Worl Petroleum. Cong. Proc.*, pp. 353-369.
- GALLOWAY, W. E. (1979): «Diagenetic control of reservoir quality in arc-derived sandstones: implications for petroleum exploration». *S. E. P. M., Spec. Publ.*, 26, pp. 251-262.
- HAWKINS, P. J. (1978): «Relationship between diagenesis, porosity reduction, and oil emplacement in late Carboniferous sandstones reservoirs. Bothamsall Oil-field, E. Midlands». *Jour. Geol. Soc.*, 135, pp. 7-24.
- HOWER, J.; ESLINGER, E. V.; HOWER, M. E., y PERRY, E. A. (1976): «Mechanism of burial and metamorphism of argillaceous sediment: I Mineralogical and chemical evidence». *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87, pp. 725-737.
- HUGGETT, J. M. (1984): «Control of mineral authigenesis in coal measures sandstones of the East Midland, U. K.». *Clay Miner.*, 19, pp. 343-357.
- HURST, A., e IRWIN, H. (1982): «Geological modelling of clay diagenesis in sandstones». *Clays Clay Miner.*, 17, pp. 5-22.
- HASTNER, M. (1971): «Authigenic feldspars in carbonate rocks». *Am. Miner.*, 56, pp. 1403-1442.
- LAMBERT, D. O., y SHOW, H. F. (1982): «Significance of clays in the petroleum geology of the Niger delta». *Clays Clay Miner.*, 17, pp. 91-103.
- MORRIS, K. A., y SHEPPERD, C. M. (1982): «The role of clay minerals in influencing porosity and permeability characteristics in the Bridport sands of Wytch Farm, Dorset». *Clays Clay Miner.*, 17, pp. 41-54.

- PETTIJOHN, F. J.; POTTER, P. E., y SIEVER, R. (1972): *Sand and sandstones*. Springer-Verlag, New York-Heidelberg-Berlin, 618 pp.
- RUNNELS, D. D. (1969): «Diagenesis, chemical sediments, and the mixing of tural waters». *Jour. Sed. Petrol.*, 39, pp. 1188-1201.
- SCHMIDT, V., y McDONALD, D. A. (1979a): «The role of secondary porosity in t course of sandstone diagenesis». *S. E. P. M., Spec. Publ.*, 26, pp. 175-207.
- SIEVER, R. (1957): «The silica budget in the sedimentary cicle». *Am. Miner.*, pp. 821-841.
- TILLMAN, R. W., y ALMON, W. R. (1979): «Diagenesis of Frontier Formation c shore bar sandstones, Spearhead Ranch Field, Wyoming». *S. E. P. M., Sp Publ.*, 26, pp. 337-378.
- WALKER, T. R. (1967): «Formation of red beds in modern and ancient deposit *Bull. Geol. Soc. Am.*, 78, pp. 353-368.
- WALKER, T. R. (1976): «Diagenetic origin of continental red beds». En: *The C tinental Permian in Central, West and South Europe*. Ed. M. Falke. Reic Dordrecht, Holland, pp. 240-282.
- WALKER, T. R., y WAUGH, B. (1973): «Intrastratal alteration of silicate miner: in late Tertiary fluvial arkose, Baja California, México». *Geol. Soc. Am., A with Prog.*, 7, pp. 853-854.
- WAUGH, B. (1978): «Authigenic K-feldspar in British Permo-Triassic sandstone *Jour. Geol. Soc. Lond.*, 135, pp. 51-56.